

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04026

研究課題名（和文）偏波輻射輸送計算で迫るブラックホールジェット根元の磁場構造とジェット駆動機構

研究課題名（英文）Study on the foot-point structure of black hole jets and the jet driven mechanism through polarimetric transfer calculations

研究代表者

嶺重 慎 (Mineshige, Shin)

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：70229780

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ブラックホールからのジェット・アウトフローの駆動機構や噴出流構造の解明、周囲へのインパクトの定量化に取り組み、以下の結果を得た。  
一般相対論的シミュレーションデータやモデルを元に相対論的偏光輻射輸送シミュレーション計算を実行し、ブラックホール近傍領域の電波強度マップおよび直線・円偏波画像をパラメータ毎に作成した。観測から磁場を制限する手法を開発し、将来の観測により磁場駆動説の妥当性を検証できる見通しを示した。  
超臨界降着流・アウトフローの輻射流体シミュレーションを実行し、輻射光度および運動論的光度が質量降着率の関数として統一的に表されることを見出し、周囲へのインパクトを定量化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールジェットの駆動機構は長年の謎である。磁場駆動説が有力だが、その直接的証拠はない。将来のEHT（事象の地平面望遠鏡）偏波観測から磁場駆動説の妥当性を議論するには、どのような直線偏光や円偏光の画像が得られるのか、明らかにすることがとても大事であり、今回の研究により、その糸口がつかめたと思う。また巨大ブラックホールから周囲へのインパクトの定量化も重要な課題であるが、10桁近いスケールの差をうめる必要がある難問である。その議論に一石を投じたのではないと思う。  
ブラックホールという存在は一般によく知られており、注目度も高い。今回の研究成果は一般向け講演会や書物を通じて共有していきたい。

研究成果の概要（英文）：We performed the following simulation studies, aiming at elucidating the driving mechanism and global structure of the jet and outflow from black hole accretion flow, and the physical impacts onto its environments.

We performed general relativistic (GR) polarization radiation transfer simulations based on the GR simulation data and obtained the radio images, the linear polarization maps, and circular polarization images for several model parameters. We then developed a methodology to constrain magnetic field properties, with which we will be able to examine the justification of the MHD model for the jet eruption. We also performed radiation hydrodynamic simulations of supercritical accretion flow and found universal laws to describe the dependence of the radiation and mechanical luminosities on the accretion rate, thereby quantifying the impact to the black hole environments.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 偏波 電波天文学 輻射流体力学 一般相対論 活動銀河核 スペクトル形成 磁場

## 1. 研究開始当初の背景

2019年4月、楕円銀河 M87 中心ブラックホールの影の EHT による撮影画像が世界に配信された(EHT collaboration 2019、図 1)。(さらに 2022 年には天の川銀河中心の Sgr A\* ブラックホールの画像も発表された。)これらはブラックホール撮像天文学の幕開けとも言える研究の好機といえよう。ブラックホール近傍の時空構造、ガス・磁場分布、ブラックホールスピンのジェット駆動との関係、時間変動の起源等、幾多の課題解明への道が開けるものとの期待が急速に高まっている。



図 1 M87 中心ブラックホールの影 (©EHT collaboration 2019)

ジェット駆動機構を例に考えよう。活動銀河核(AGN)が生み出すジェットの駆動機構は、長年に渡って天文学最大の謎の 1 つである。この謎を解決するため、電波・X 線観測や数値シミュレーションを用いた研究が盛んに行われてきた。今や多くの研究者は(少なくとも M87 など低光度 AGN では)磁場がジェット駆動に本質的であると考えている(Blandford & Znajek 1977; Blandford & Payne 1982)。ジェット根元部分での磁場構造と時間変動がジェット駆動機構の解明の鍵を握ると信じられている。その線に立ち、一般相対論的磁気流体力学(GR-MHD)計算が近年、盛んになされている(Mckinney 2006; Tchekhovskoy+2011; Takahashi+2018 ほか多数)。しかし初期磁場構造や電子温度決定等に不定性が残る。理論研究だけでは限界がある。ブレイクスルーには観測データが必要だ。

ジェット根元の磁場構造は、シンクロトロン放射に起因する偏波を優れた空間分解能で捉えることにより可能となる。しかしそれには超のつく角度分解能が必要であり、世界の研究者が EHT の成果を待ち望んでいたのだ。その意味で、ブラックホール撮像天文学の創始は理論研究にとっても千載一遇の好機であるといえる。

われわれはこのような考えの下、(科研費申請時点で)すでに開発済みであった一般相対論的(GR)偏波輻射輸送計算コードを用いて、GR-MHD シミュレーションデータ(Nakamura+2018)のイメージ解析を進め、以下の結果を得ていた(Tsunetoe, Mineshige et al. 2019)。

- ・降着流とカウンタージェット(視線方向の反対側に出るジェット)からの光の中にブラックホールシャドウ(影)が現れる。
- ・直線偏波ベクトルはほぼ元々の磁場構造を反映するが、視線上プラズマによるファラデー回転が強いとその情報は薄められる。
- ・円偏波はファラデー変換(直線偏波が磁気プラズマ中で円偏波に変換される効果)により強められ、しかもその空間分布はファラデー回転を受ける前の直線偏波分布を色濃く受け継ぐ。

すなわち、シンクロトロン放射がほとんど生み出さない故(科研費申請時には)ほとんど注目されていなかった円偏波を使えば、ジェット根元の磁場構造に関する情報を得ることができる!これが本科研費申請の中核をなすアイデアであった。

## 2. 研究の目的

まず本科研費の目的は、相対論的ジェットをはじめとする、ブラックホール中心領域からの噴出流の起源や構造・ダイナミクスを解明することである。学問的問いは 3 つある。

- (1) 相対論的ジェットの駆動機構: ずばりそれは何か、磁場は本質的役割を演じているのか
- (2) 時間依存性: 間欠的な降着や噴出はどのように生み出され、観測結果にどう影響するか
- (3) 多様性理解: 高光度クェーサーからの噴出流特性は低高度の場合と同じか

これらの問いに答えるべく、本研究の目的を以下のように設定した。本研究の新規性・独創性と併せて 3 項目毎に記述する。

### (1) 相対論的ジェットの駆動機構

近年の超長基線電波干渉系(VLBI)観測では空前の高分解能が実現し、一方で一般相対論的磁気流体(GR-MHD)及び一般相対論的輻射磁気流体(GR-R-MHD)シミュレーションも日進月歩の進展を見せる。本研究は、両者を結び合わせ、さらに独自開発の GR 偏波輻射輸送計算コードを駆使して、上記の問いへの答えを求めようとするものである。

本研究の新規性は、当時、ほとんど注目されていなかった円偏波に着目する点にある。AGN ジェットはシンクロトロン放射により電波を放射し、その偏波は磁場の方向や強度を強く反映する。そこで偏波観測の理論シミュレーションを行い、近く発表が予想される EHT の地平線付近の偏波分布と直接比較すれば、AGN ジェットの駆動機構の解明が期待できる。更に EAVN(東アジア VLBI ネットワーク)結果を合わせると加速機構に関する知見も得られる。

### (2) 時間依存性

近年の GR-MHD 計算から、ガスがブラックホールに間欠的に落下していることが分かっている(e.g. Moriyama+2017)。実際、M87 の EHT 観測では 1 週間の期間でイメージ変動した痕跡が見られる。一方、銀河中心 SgrA\* はフレアを繰り返すことが知られている。シミュレーションデータを、時間を区切って解析することにより、変動の成因や観測結果への影響を調べる。

磁場は乱流を生み出し、降着流は不均一で間欠的となる。また磁気リコネクションに伴うフレア(爆発的エネルギー解放現象)も起こりうる。これらの相乗作用として、輻射に時間依存性がうみだされる。そこから時空構造に関する情報も得られる

### (3) 多様性理解

M87は(エディントン光度より何桁も暗い)低光度AGNに分類されるが、クエーサー等、極めて明るいAGNでも相対論的ジェットの出が観測されている。その駆動には輻射の効果が寄与すると予想され(e.g. Takeuchi+2010)、低光度AGNのジェットとは本質的に異なる可能性がある。クエーサージェットでも電波帯で高い偏波度が観測されており(e.g. Asada+2002)、向きのそろった磁場構造の存在が予想される。輻射流体シミュレーションを実行し観測と照合することにより、多様性・普遍性に関する知見を得る。

輻射流体シミュレーションはわれわれが先駆的に計算を進め十年に渡って世界をリードしてきた分野である。この優位性を活かして先駆的成果が期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究では、3つの課題ごと、それぞれ手法は若干異なるので項目別に説明する。

### (1) 相対論的ジェットの駆動機構

この課題には、独自開発した一般相対論的(GR)偏波輻射輸送計算コード(Tsunetoe+2019)を用いる。輸送方程式の係数は熱的/非熱的シンクロトロン電子について導出されたもの(Dexter 2016)を実装した。ブラックホール降着流・ジェットとして、既存のデータおよび新たに計算するGR-MHDシミュレーションデータを用いる。観測データとの照合のため、EHT観測で用いられるのと同じデータ処理ライブラリ SMILI (Sparse Modeling Imaging Library for Interferometry, Akiyama+2017)を用いて模擬観測処理を行い、実観測と限りなく条件をそろえた理論偏波イメージを作成する。

### (2) 時間依存性

この課題も(1)と同様、GR-MHDシミュレーションデータを用いる(シミュレーションは時間変動を示す)。このデータをGR偏波輻射輸送計算コードにより解析する。

### (3) 多様性理解

この課題には、大須賀健氏(つくば大学)が独自開発した(非相対論的)輻射流体力学コードを用いる。

## 4. 研究成果

### (1) 相対論的ジェットの駆動機構

直線偏波および円偏波画像の作製:

科研費申請当時、ほとんど注目されていなかった円偏波画像こそがジェット根本の磁場構造を如実に反映するケースが多々あるとの新知見を受けて、幅広いパラメータ領域で計算した結果、電波輻射・偏波画像に見られる特徴が、(1)円盤にほぼ垂直方向からみている場合(M87ブラックホールに相当)と、(2)ほぼ円盤面方向からみている場合(銀河系中心ブラックホールに相当)との2タイプの特徴の重ね合わせで理解できることを示した。さらにそれぞれについて(GRMHDシミュレーションが予測する)らせん形状磁場がどのように直線・円偏波画像に現れるかを調べた結果、一般に円偏波はある境界線の左右で反対の円偏波成分を示すこと、同じ境界線上で直線偏波が極端に大きくなることが判明した(図2)。将来のEHT観測でこのような特徴が得られると、それはらせん形状磁場の証拠となり、ジェット噴出メカニズムの解明に大きく近づくこととなる。

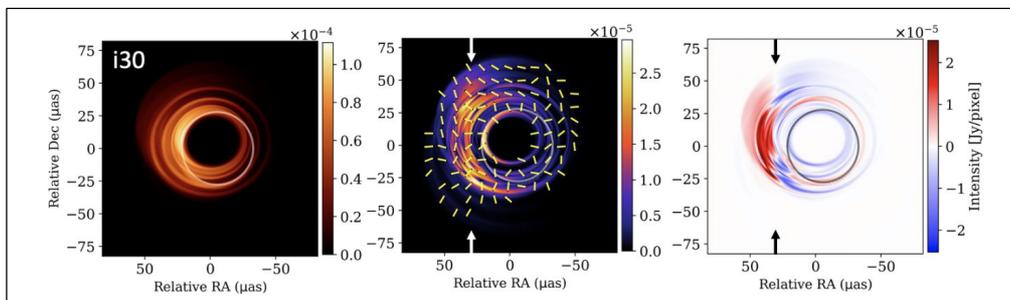


図2: 左から電波強度(Stokes I)画像、直線偏波画像と電場ベクトル、円偏波画像。らせん型磁場が卓越した結果、円偏波画像は矢印で示した線分を境に正負逆転する(Tsunetoe+22)

さらに質量降着率や電子温度、観測波長を変えて一般相対論的輻射輸送シミュレーションを実行し、直線偏波画像および円偏波画像を得た。そして「直線偏光と円偏光の強度分布が、それぞれ輻射全強度に対してジェット下流側と上流側に分離する」(図3)という特徴がじつは電波の波長や降着率に依存することを見出した。こうしてジェット根本の磁場構造の情報を定量的に引き出す指標を見いだすことができた。

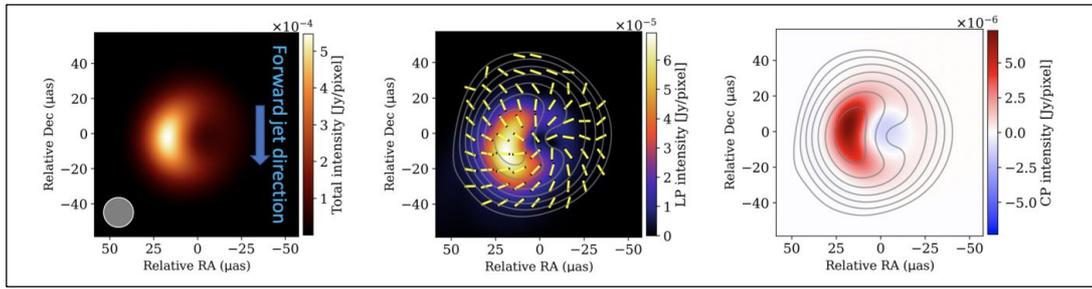


図3 ETH 観測に合わせガウシアンビームでならした画像：左から電波強度（Stokes I）、直線偏波、円偏波。直線偏波強度は中心よりやや下に、円偏波強度はやや上に偏る傾向がある（Tsunetoe+23）。

### 非熱的粒子の効果

非熱的電子に着目して同様の計算を進めた。非熱的電子は磁場と垂直方向の偏光成分を強く吸収する。その結果、直線偏光の偏向角は光学的に厚い部分と薄い部分で90度シフトすること、そのようなシフトはカウンタージェットと光子リングの画像に如実に表れることを発見した(図4)。こうして、熱的粒子と非熱的粒子の構成比に関する知見が得られるだけでなく、上記解析とは独立に磁場強度や向きに関する知見も得られる道筋がたった。

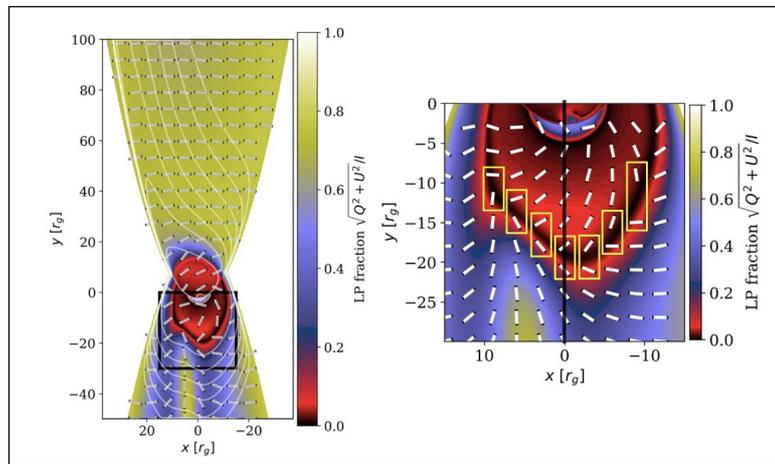


図4：非熱的粒子による直線偏波強度と電場ベクトルの分布。左図は全体図、右図はその一部の拡大。黄色い四角で囲んだ領域の上下で、ベクトルの向きが90度シフトする(Tsunetoe+24)。

### (2) 時間依存性

(1)の に述べたシミュレーションと同様の解析を異なる時刻のスナップショット毎に計算したところ、定性的な違いはないものの、定量的には多少の変動がみられた。また同じジェット構造をみる角度をかえて計算してみたところ、画像は大きく変化した。これはジェット噴出方向がふらつくと、観測画像も変動することを示唆する。こうして、時間変動幅を見極めた上で、電子温度などの理論の不定性が、両偏波画像の比較から除去できる方策を得る見通しがたった。こうして「偏波画像から磁場構造の情報を得る」という目標に向けて大きく前進したといえる。

### (3) 多様性理解

超臨界降着流からのアウトフローの大スケール計算：

ブラックホールが周囲に与える影響を調べるのが難しい理由の一つは、物理過程の長さスケールが大きく異なることによる。たとえば太陽質量の1000倍の質量をもつブラックホールを考えると、そのサイズはおよそ $10^9$  cmである。一方、宇宙論的シミュレーションで到達できるグリッドサイズはせいぜいサブパーセク、すなわち $10^{18}$  cmであり、9桁の差がある。したがって単一のシミュレーションで、精度良くアウトフローの発生と伝搬を解くことはできない。そういう理由で、ブラックホール・フィードバックの研究は、ブラックホール近傍を分解するブラックホールスケールシミュレーションと、宇宙の大規模構造を計算する宇宙論的シミュレーションと、大きく二つのグループに分かれていた。

そこで、シミュレーションボックスを内側ボックス(2-3000)  $r_S$  ( $r_S$ はシュバルツシルド半径)と外側ボックス(2000 -  $3 \times 10^6$ )  $r_S$  とに分割して両者を接続する手法(nested grid method)を新たに開発した。この方法によりコード開発して計算を実行したところ、6桁を超えるスケールのアウトフローの構造を明らかにすることができた(図5)。こうして明らかにされたアウトフローのインパクトは従来の予想に反して思いのほか強く、0.1 pcにおいて、エネルギー(光度)は(0.1 - 10)  $L_E$ であった( $L_E$  エディントン光度)。またきわめて非等方な構造をもっていることも特筆すべきである。

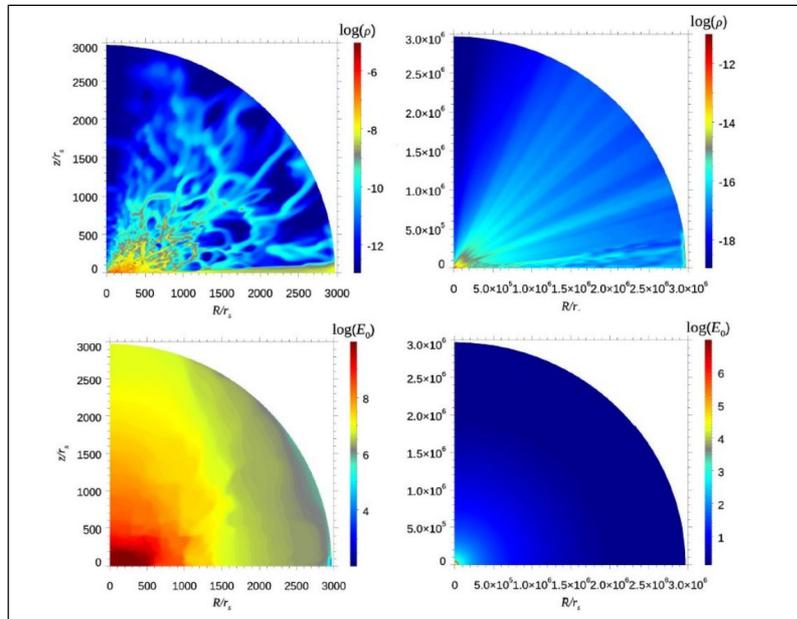


図5 Nested grid simulation により計算した広範囲のアウトフロー構造。左が内側ボックス、右が外側ボックスのシミュレーション結果、それぞれ上が密度分布、下が輻射エネルギー分布である ( Botella Lasaga+2022 )

超臨界降着流アウトフローの定量化:

従来より降着ガスの初期角運動量やシミュレーションボックスを広げた超臨界降着流が生み出すアウトフローの輻射流体シミュレーションを実行したところ、運動論的光度が質量降着率の 1.7 乗から 2.7 乗に比例して、降着率上昇とともに激しく上昇することを見出した ( 図 6 )。こうして、ブラックホール質量や降着率など、幅広いパラメータスペースにおいて、アウトフロー量やその特性をある程度、定量化することができた。

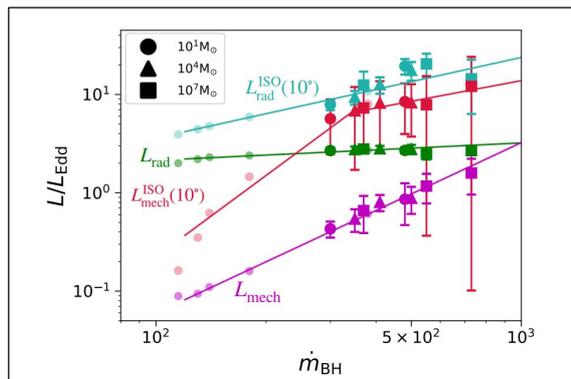


図 6 : (規格化された) 輻射および運動論的光度の (規格化された) 質量降着率への依存性。それぞれブラックホール質量によらず一つの線にのることが分かる ( Yoshioka+24 )

軟 X 線超過の「温かいコロナモデル」の構築

AGN の X 線スペクトルを見ると 2 keV 以下に (ハード側のべき型スペクトルに対し) 明らかに軟 X 線超過がみられる。その正体は不明だが、これは未解明の降着流構造の存在を意味し、アウトフロー機構を解明する上でも重要である。その正体として「温かいコロナ」が有力視されているが、その解析モデルの構築を行った。AGN 円盤の鉛直方向をみると、吸収が卓越する円盤本体の上に散乱が卓越する大気がのっている ( 図 7 )。円盤表面から出た軟 X 線光子が、円盤大気の中でコンプトン冷却し、それが大気中での異常加熱とバランスするとするとおよそ百万 K の温度となった。こうして熱いコロナ ( 温度 ~ 十億度 ) と、降着円盤 ( ~ 数十万度 ) のちょうど中間の温度 ( 約百万度 ) の層の存在が証明できた。

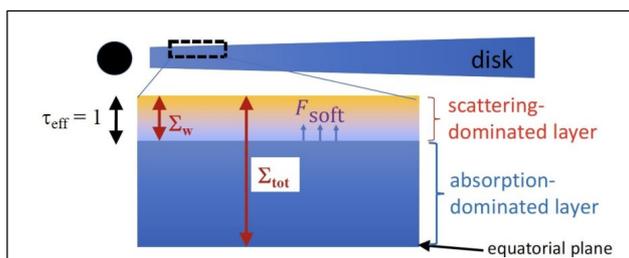


図 7 温かいコロナモデルの説明図。吸収が卓越する円盤本体の上に散乱が卓越する大気がのっており、その温度は約百万 K であることが示された ( Kawanaka & Mineshige 2024 )

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawanaka, Norita, and Mineshige, Shin	4. 巻 76
2. 論文標題 Model of a "Warm Corona" as the origin of the soft X-ray excess of active galactic nuclei	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 306-315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psae012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshioka, Shogo ; Mineshige, Shin ; Ohsuga, Ken ; Kawashima, Tomohisa ; Kitaki, Takaaki	4. 巻 74
2. 論文標題 Large-scale outflow structure and radiation properties of super-Eddington flow: Dependence on the accretion rates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 1378-1395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsunetoe, Yuh; Mineshige, Shin; Kawashima, Tomohisa; Ohsuga, Ken; Akiyama, Kazunori; Takahashi, Hiroyuki R.	4. 巻 10
2. 論文標題 Diverse Polarimetric Features of AGN Jets from Various Viewing Angles: Towards a Unified View	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 103-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies10050103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsunetoe, Yuh; Mineshige, Shin; Kawashima, Tomohisa; Ohsuga, Ken; Akiyama, Kazunori; Takahashi, Hiroyuki R.	4. 巻 931
2. 論文標題 Investigating the Disk-Jet Structure in M87 through Flux Separation in the Linear and Circular Polarization Images	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrophysical J.	6. 最初と最後の頁 id.25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac66dd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Botella, Ignacio; Mineshige, Shin; Kitaki, Takaaki; Ohsuga, Ken; Kawashima, Tomohisa	4. 巻 74
2. 論文標題 Structure of the super-Eddington outflow and its impact on the cosmological scale	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 384-397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitaki, Takaaki ; Mineshige, Shin ; Ohsuga, Ken ; Kawashima, Tomohisa	4. 巻 73
2. 論文標題 The origins and impact of outflow from super-Eddington flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 450-466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawanaka, Norita ; Mineshige, Shin	4. 巻 73
2. 論文標題 What determines the unique spectra of super-Eddington accretors? Origin of optically thick and low-temperature coronae in super-Eddington accretion flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 630-638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab023	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogawa, Takumi ; Ohsuga, Ken ; Makino, Yoshihiro ; Mineshige, Shin	4. 巻 73
2. 論文標題 Variability of Comptonized X-ray spectra of a super-Eddington accretor: Approach using Boltzmann radiation transport	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 701-715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab031	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsunetoe, Yuh; Mineshige, Shin ; Ohsuga, Ken ; Kawashima, Tomohisa ; Akiyama, Kazunori	4. 巻 73
2. 論文標題 Polarization images of accretion flow around supermassive black holes: Imprints of toroidal field structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 912-928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab054	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeo Eishun, Inayoshi Kohei, Mineshige Shin	4. 巻 497
2. 論文標題 Hyper-Eddington accretion flows on to black holes accompanied by powerful outflows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 302 ~ 317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1906	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsunetoe Yuh, Mineshige Shin, Ohsuga Ken, Kawashima Tomohisa, Akiyama Kazunori	4. 巻 72
2. 論文標題 Polarization imaging of M 87 jets by general relativistic radiative transfer calculation based on GRMHD simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 芳岡尚悟
2. 発表標題 大質量ブラックホールへの超臨界降着流と大局的アウトフロー構造
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川中宣太
2. 発表標題 活動銀河核の軟X線超過の起源：温かいコロナの加熱とその安定性
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 恒任優
2. 発表標題 銀河系中心Sgr A*の偏光画像から探る磁場構造、および活動銀河核ジェット駆動機構解明へのシナジー
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芳岡尚悟
2. 発表標題 超臨界降着流からのアウトフロー；運動学的光度の質量降着率依存性とその起源
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川中宣太
2. 発表標題 活動銀河核の軟X線超過の起源としての温かいコロナモデル
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 恒任 優
2. 発表標題 ブラックホール直近領域の偏光画像から探る活動銀河核ジェットの駆動磁場構造
3. 学会等名 つくば宇宙フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 恒任 優
2. 発表標題 直線偏光・円偏光画像から探る、活動銀河核M87のジェットー円盤構造
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芳岡尚悟
2. 発表標題 超臨界降着流からのアウトフローの特性
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川拓未
2. 発表標題 一般相対論的ボルツマン輻射輸送による超臨界降着流の輻射スペクトル計算
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 恒任優
2. 発表標題 輻射輸送シミュレーションの新地平～EHT偏波イメージ予測で探る磁場構造
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川中宣太
2. 発表標題 超臨界降着流におけるコロナモデルとその放射スペクトルの特徴
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森山小太郎
2. 発表標題 EHT動画撮像を用いたSgrA*への落下ガス雲の解明とブラックホールスピンの測定
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	芳岡 尚悟  (Yoshioka Shogo)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	川中 宣太  (Kawanaka Norita)		
研究協力者	恒任 優  (Tsunetoe Yuh)		
研究協力者	小川 拓未  (Ogawa Takumi)		
研究協力者	森山 小太郎  (Moriyama Kotaro)		
研究協力者	ボテヤ・ラサガ イグナシオ  (Botella Lasaga Ignacio)		
研究協力者	北木 孝明  (Kitaki takaaki)		
研究協力者	大須賀 健  (Ohsuga Ken)		
研究協力者	川島 朋尚  (Kawashima Tomohisa)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------